



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2009115109/28, 20.04.2009

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.04.2009

(45) Опубликовано: 20.06.2010 Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 803674 A1, 07.02.1982. RU 2092872 C1,
10.10.1997. RU 2269798 C2, 10.02.2006. JP
58148984 A, 05.09.1983.

Адрес для переписки:
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, "УГТУ-
УПИ", Центр интеллектуальной
собственности, Т.В. Маркс

(72) Автор(ы):

Игнатьев Олег Валентинович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

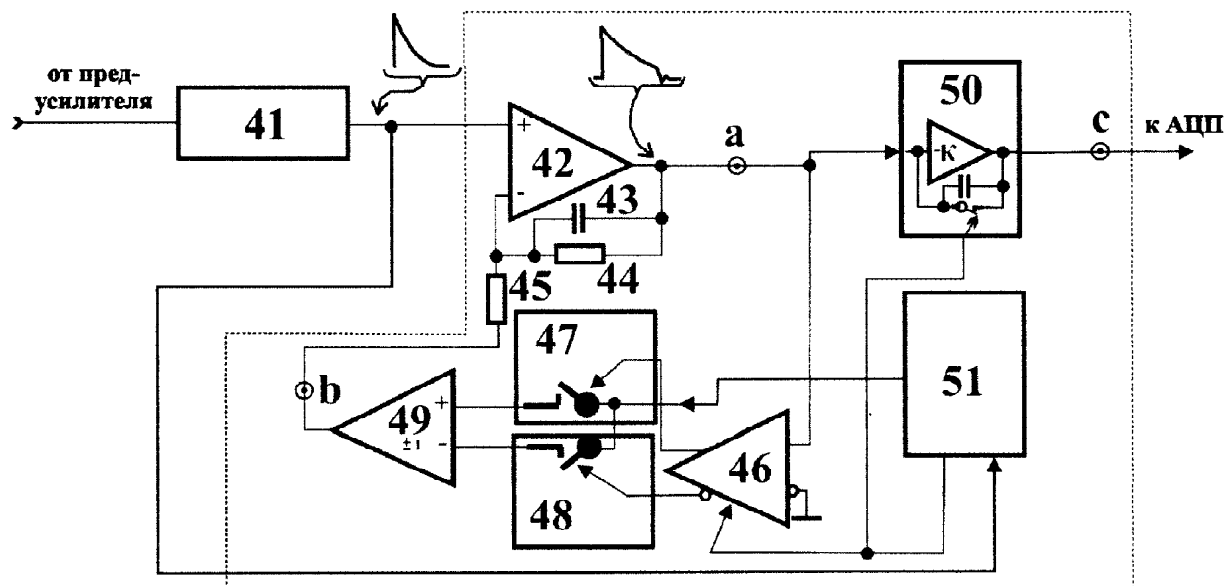
Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования "Уральский государственный
технический университет - УПИ имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина"
(RU),
Общество с ограниченной
ответственностью "Научно-
производственная компания "Атом
Электроникс" (RU)

(54) СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СПЕКТРОМЕТРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ И ДРУГИМИ ДЕТЕКТОРАМИ БЕЗ ВНУТРЕННЕГО УСИЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области ядерной
электроники, точнее к спектрометрам
ионизирующих излучений с детекторами без
внутреннего усиления, где сильно влияние
электронного шума на энергетическое
разрешение. Технический результат - на основе
временвариантных формирователей создание
большого числа формирователей импульсов с
укорачиванием неинформативной их части без
ухудшения отношения сигнала к шуму.
Увеличение быстродействия достигают
укорачиванием неинформативной части
каждого спектрометрического импульса, а
также их суперпозиций, образующихся из-за
наложений, инъекцией компенсирующего
заряда в конденсатор, составляющий часть
спектрометрического формирователя

импульсов. Инжекцию осуществляют
компенсирующим током, изменяющим
направление при пересечении процессом
заданного уровня; при этом для достижения
быстрого укорачивания и точного приведения
укорачиваемого импульса к базовому уровню
знакопеременный компенсирующий ток по
ходу процесса уменьшают в функции времени
таким образом, чтобы на заключительной
стадии процесса компенсации вызываемые им
изменения напряжения на упомянутом
конденсаторе составляли не более 1/10 от
среднеквадратичного значения шума в точке
компенсации до ее начала, а
продолжительность заключительной стадии
компенсации выбирают не меньшей чем
 $5\sqrt{3} / \Delta f$, где Δf - полоса частот шума в
точке компенсации. 13 ил., 1 табл.



Фиг. 12

RU 2 3 9 2 6 4 2 C 1

RU 2 3 9 2 6 4 2 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21), (22) Application: **2009115109/28, 20.04.2009**(24) Effective date for property rights:
20.04.2009(45) Date of publication: **20.06.2010 Bull. 17**

Mail address:

**620002, g.Ekaterinburg, ul. Mira, 19, "UGTU-
UPI", Tsentr intellektual'noj sobstvennosti, T.V.
Marks**

(72) Inventor(s):

Ignat'ev Oleg Valentinovich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovaniya
"Ural'skij gosudarstvennyj tekhnicheskij
universitet - UPI imeni pervogo Prezidenta
Rossii B.N. El'tsina" (RU),
Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'ju
"Nauchno-proizvodstvennaja kompanija "Atom
Elektroniks" (RU)**

**(54) METHOD FOR INCREASE OF OPERATIONAL SPEED OF IONISING RADIATION
SPECTROMETRES WITH SEMICONDUCTOR AND OTHER DETECTORS WITHOUT INNER
AMPLIFICATION**

(57) Abstract:

FIELD: measurement equipment.

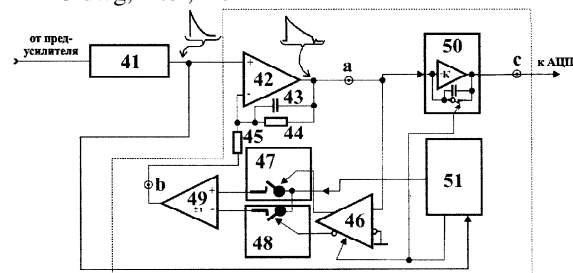
SUBSTANCE: invention relates to nuclear electronics, in particular - to ionising radiation spectrometres with detectors without inner amplification where impact of electronic noise on energy resolution is considerable. Operational speed increase is achieved through shortening the non-informative part of each spectrometric pulse as well as their superposition resulting from overlay, injection of a compensating charge into the capacitor forming part of the spectrometric pulse formation. Injection is performed with compensation current that changes direction when the process crosses the preset level. For quick shortening and precise reduction of the pulse being shortened to the basic level the alternating compensation current in the course of the process is decreased in the time function so the at the compensation process final stage the voltage variations caused by it on the said capacitor are no

more than $1/10$ of the mean square value of noise at the compensation point prior to its commencement, while the compensation final stage duration is selected no less than $5\sqrt{3}/\Delta f$, where Δf - noise

band at the compensation point.

EFFECT: creation of numerous pulse formers with shortening of their non-informative part without deterioration of the signal to noise ratio based on time-variant formers.

13 dwg, 1 tbl, 2 ex



Фиг. 12

Настоящее изобретение относится к области ядерной электроники, точнее к аналоговым устройствам тех из спектрометров ионизирующих излучений, где у ионизационного детектора отсутствует внутренне усиление и, следовательно, существенно влияние электронного шума на энергетическое разрешение.

Преимущественное применение - спектрометры рентгеновского и γ -излучений низких и средних энергий с полупроводниковыми детекторами и с ионизационными камерами, а также γ -спектрометры со сцинтилляционными детекторами с фотодиодным преобразованием света в электрический сигнал

В состав типичного "классического" полнофункционального спектрометра ионизирующих излучений на базе полупроводникового детектора (ППД) входят (см. фиг.1) помимо собственно ППД 1 [CANBERRA. Instrument Catalog, Edition 9]: зарядочувствительный предусилитель 2 с тем или иным механизмом восстановления исходного напряжения на емкости обратной связи C_f ; линейный спектрометрический усилитель 3, содержащий собственно усилитель, формирователь спектрометрических импульсов одного из типов, стабилизатор базовой линии и инспектор наложений; "быстрый" усилитель 4; инспектор наложений 5; стретчер 6 (обычно входит в состав модуля аналого-цифрового преобразователя) и собственно аналого-цифровой преобразователь 7, допускающий управление (блокировка входа и сброс "запомненного" амплитудного значения спектрометрического импульса) со стороны инспектора наложений; интерфейс и устройство накопления и цифровой обработки спектрометрической информации (в качестве последних в настоящее время наиболее часто используются персональные компьютеры, на фиг.1 не показаны).

Роль каждого из элементов тракта ППД - спектрометра подробно описана в монографии [Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике/ Ю.К.Акимов, О.В.Игнатъев, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук. - М.: Энергоатомиздат, 1989 г., 344 с.]. Зарядочувствительный предусилитель 2 с полевым транзистором на входе служит для преобразования индуцированного излучением в материале ППД заряда в импульс пропорциональной амплитуды. Главное требование - внесение минимума шумов со стороны предусилителя. Важнейшей функцией спектрометрического усилителя 3 помимо усиления сигналов до уровня, обеспечивающего последующее преобразование в цифровой код, является максимизация отношения сигнала к шуму (С/Ш) с помощью спектрометрического формирователя с постоянными либо переменными во времени параметрами (временнoвариантный или времявариантный формирователь). Роль остальных элементов очевидна: быстрый усилитель 4, инспектор наложений 5 и стретчер 6 выполняют функцию обнаружения и режекции наложенных спектрометрических импульсов. На фиг.2 приведены временные диаграммы в выделенных точках спектрометра. В современных спектрометрах ионизирующих излучений все электронные функциональные узлы после зарядочувствительного предусилителя, включая аналого-цифровой преобразователь, выполняются в виде единого модуля или прибора, который называется процессором спектрометрических импульсов.

В диапазоне рентгеновского и "мягкого" γ - излучений существенный, а часто и основной вклад в энергетическое разрешение, вносят шумы электронного канала. Основную роль в их подавлении играет спектрометрический формирователь, он же ограничивает быстродействие всего спектрометра. Существующая теория фильтрации шумов в спектрометрах ионизирующих излучений (см., например, [Baldinger E., Franzen W. Adv. In electronics and electron physics, 1956, v8, p.255]) позволяет найти оптимальный, согласованный со спектром сигнала и шума формирователь (Matched

Shaper - MSh). Функция памяти спектрометра с таким формирователем, или, что то же самое, весовая функция $W(t)$, получаемая как наблюдаемая в заданный момент времени реакция на δ -импульс по входу, прикладываемый в последовательные моменты времени от $t=-\infty$ вплоть до момента измерения амплитуды данного импульса при $t=T_{\text{meas}}$ представляет собой симметричный треугольник с вогнутыми сторонами и бесконечной длительностью. В литературе такую форму называют CUSP-формой. Все реальные спектрометры имеют функцию памяти $W(t)$ конечной длительности и другой формы (треугольная, квазигауссова и многие др.), соответственно отношение сигнала к шуму в них всегда хуже, чем могло бы быть с "согласованным" формирователем. То, во сколько раз отношение сигнал/шум на выходе спектрометра с MSh было бы выше, чем с данным типом формирователя, характеризует CUSP-фактор, обозначаемый CF. Для спектрометров с наиболее совершенными формирователями импульсов $C \geq 1,03$, т.е. степень подавления шумов в нем лишь на 3% хуже, чем теоретически возможно. Для спектрометра с простейшим формирователем, состоящим из CR-дифференциатора и RC-интегратора (CR+RC - формирователь) $CF \geq 1,36$, т.е. отличие от теоретического предела составляет 36%. Для спектрометров с времяинвариантным формированием сигналов $W(t)$ жестко связана с формой спектрометрических импульсов. Она представляет собой спектрометрический импульс, задержанный на время T_{meas} и зеркально отраженный относительно вертикальной оси, проведенной через точку $t=T_{\text{meas}}$ (фиг.3) и характеризует тот вес, с которым шумовые δ -импульсы, возникающие в предшествующие моменту измерения амплитуды, вкладываются в максимум измеряемого сигнала. Таким образом, форма спектрометрического импульса на выходе времяинвариантного формирователя целиком и полностью описывает свойства спектрометра в отношении подавления шума и, как понятно, быстродействия.

Упомянутые значения CF достигаются при условии, что временной масштаб формирования выбран в соответствии со спектральной плотностью шума детектора и предусилителя данного спектрометра. Для каждого типа формирователя существует свое строго определенное соотношение между T_{meas} и т.н. константой шума τ_c (τ_c - постоянная времени простого CR-дифференцирующего фильтра, превращающего частотно-зависимый шум предусилителя в "белый"). При современных полевых транзисторах, используемых в предусилителях, приходится устанавливать пиковое время T_{peak} (или момент измерения амплитуды T_{meas}) сигналов на выходе усилителя в несколько десятков микросекунд. Если учесть, что в коммерческих спектрометрах чаще всего применяются времяинвариантные фильтры, создающие квазигауссову или треугольную импульсную характеристику спектрометра [CANBERRA. Instrument Catalog, Edition 9, 338p., EG and G Ortec. Catalog 1999 y.], то длительность спектрометрических импульсов по основанию составляет $T_w \geq 3T_{\text{peak}}$, что может достигать 100 μs . В спектрометрах с полупроводниковыми детекторами влияние формирователя импульсов на быстродействие двояко. Они ограничивают "быстродействие по входу" и "быстродействие по выходу". Устойчивость спектрометра по отношению к статистической загрузке по входу характеризуют максимально допустимой загрузкой $R_{\text{in_max}}$, при которой сдвиг пиков аппаратного спектра $\Delta E/E$ и уширение пиков $\Delta \eta/\eta$ не превышают заданных значений (обычно $\Delta E/E \leq 0,1 \div 0,2\%$, а $\Delta \eta/\eta \leq 10 \div 15\%$). И та и другая величина в наибольшей степени зависят от качества работы стабилизатора базовой линии спектрометра, которому необходимы свободные промежутки между статистически распределенными во времени сигналами детектора, чтобы оценить отклонение базовой линии от заданного уровня (обычно нуля). Понятно, что вероятность появления свободных интервалов с

ростом R_{in} падает. Обычно стабилизаторы базовой линии не вносят существенных погрешностей при факторе занятости $DF=R_{in} \times T_w \leq (1 \div 1,5)$. Отсюда

$$R_{in_max} \leq (1 \div 1,5) \times T_w^{-1}. \quad \text{При } T_w \geq 3T_{peak} = 100 \mu s \quad R_{in_max} \text{ всего лишь } (10 \div 15) \times 10^3 1/s.$$

- 5 Если бы удалось избавиться от неинформативной части спектрометрических импульсов (см. фиг.3), т.е. добиться того, чтобы $T_w \geq 1 \times T_{peak}$, то "быстродействие по входу" выросло бы при прочих равных условиях втрое - $R_{in_max} \leq (30 \div 45) \times 10^3 1/s$.

Ограничения в "быстродействии по выходу" вытекают из вероятностного процесса наложений спектрометрических импульсов. Зависимость скорости накопления "очищенных" от наложений событий R_0 , от скорости счета R_{in} по входу спектрометра дается выражением [Becker T.H. et al/ Characteristics of high-rate energy spectrometers with time-invariant filters. IEEE Trans. V. NS-28 (1981) №3, p.598-602]:

$$15 \quad R_0 = R_{in} / \exp(R_{in} \times T_{p-u}) \quad (1)$$

где T_{p-u} - интервал наложений, при времяинвариантном формировании $T_{p-u} = T_w$.

Максимальная скорость накопления спектра R_{0_max} из (1) равна:

$$R_{0_max} = 1/e \times T_{p-u}^{-1} \quad (2)$$

- 20 Для рассмотренного примера при $T_w \geq 3T_{peak} = 10 \mu s$ $R_{0_max} = 3,7 \div 10^3 1/s$. Если бы отсутствовала неинформативная часть импульсов, т.е. $T_w \geq 1 \times T_{peak}$, то $T_{p-u} = 2 \times T_{peak} = 2T_w/3$ и $R_{0_max} = 5,6 \times 10^3 1/s$. Попытка увеличить быстродействие спектрометра уменьшением констант формирования приводит к ухудшению энергетического разрешения при малых и средних статистических нагрузках. Такой прием применим
- 25 далеко не во всех случаях.

Радикальным способом повышения быстродействия полупроводниковых х- и у спектрометров является применение тех из времявариантных спектрометрических формирователей, которые при заданном T_{peak} (или T_{meas}) обеспечивали бы требуемое

30 значение CUSP-фактора и минимально возможную длительность импульсов по основанию.

Одним из наиболее совершенных времявариантных формирователей является формирователь со структурой $[(CR)_{dif} + Sw + GI]$, показанный на фиг 4 [O.V.Ignatyev, A.D.Pulin. Comparative study of perspective time-variant spectrometry shapers.

35 Твердотельные детекторы ионизирующих излучений: Труды симпозиума ТТД-97 / Под ред. В.С.Кортова и др.. Екатеринбург: УГТУ, 1998, с.175-182]. Формирователь содержит CR-дифференциатор 8 (с компенсацией полюса нулем, если в предусилителе есть резистор обратной связи), нормально разомкнутый электронный ключ 9 (в

40 иностранной литературе обозначают как Sw), буферный каскад 10 (этот элемент не принципиален), стробируемый "идеальный" интегратор 11 (обозначают GI) и устройство управления электронным ключом 12. Электронный ключ служит цели уменьшения в m - раз постоянной времени дифференцирования за счет шунтирования резистора CR - дифференциатора.

45

На фиг.5 приведены временные диаграммы в выделенных точках, поясняющие принцип действия формирователя, а также функция памяти спектрометра $W(t)$. Здесь длительность по основанию (поз. Vc) почти равна времени достижения максимума благодаря тому, что после завершения интегрирования части экспоненциального

50 входного импульса остаточная часть экспоненты быстро укорачивается с помощью электронного ключа 9. Более того, если на входе формирователя образуется групповой импульс из нескольких близко расположенных сигналов блока детектирования (собственно детектор и предусилитель), то замыканием электронного

ключа его длительность можно свести к минимуму (стробируемый интегратор 11 в этом случае не запускается).

В работах [Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К.Акимов, О.В.Игнатъев, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук/ - М.: Энергоатомиздат, 1989 г., 344 с., O.V.Ignatyev, A.D.Pulin. Comparative study of perspective time-variant spectrometry shapers. Твердотельные детекторы ионизирующих излучений: Труды симпозиума ТТД-97 / Под ред. В.С.Кортова и др. Екатеринбург: УГТУ, 1998, с.175-182.]

показано, что все спектрометрические времявариантные формирователи, обладающие свойством укорачивать групповые импульсы, обусловленные наложениями, одновременно обладают и свойством создавать так называемый нестационарный, зависящий от скорости счета шум (в иностранной литературе "count-rate dehended noise"). Природа этого шума достаточно очевидна. Укорачивание группового импульса возможно, если при его возникновении уменьшаются на время его действия постоянные времени CR-дифференциатора и/или RC-интегратора, входящих в состав формирователя спектрометрических импульсов. Это означает, что на время малых значений констант формирования ухудшается фильтрация высокочастотных составляющих шума. В момент возврата констант к номинальному значению на элементах памяти формирователя (конденсаторах дифференциатора и/или интегратора) запоминается мгновенное значение ВЧ-шума, которое затем случайным образом суммируется со следующим за групповым нормальным спектрометрическим импульсом. Естественно, это увеличивает погрешность измерения его амплитуды, несущей информацию об энергии соответствующего кванта, зарегистрированного детектором.

Возникновение нестационарного шума приводит к необходимости введения после окончания каждого укорачивания определенного "защитного" времени (в иностранной литературе - "protection time") T_{pr} для уменьшения запомненной шумовой составляющей. Если следующий спектрометрический импульс возникает на интервале "защитного" времени, то он также подвергается укорачиванию, а его амплитуда не измеряется. Фиг.5 и данные табл.1 иллюстрируют описанную ситуацию [O.V.Ignatyev, A.D.Pulin. Comparative study of perspective time-variant spectrometry shapers. Твердотельные детекторы ионизирующих излучений: Труды симпозиума ТТД-97 / Под ред. В.С.Кортова и др. Екатеринбург: УГТУ, 1998, с.175-182.].

Из анализа таблицы следует, что преимущества от укорачивания спектрометрических импульсов с помощью электронного ключа Sw нивелируются необходимостью введения достаточно большого защитного времени, иначе в спектрометре падает отношение сигнала к шуму и соответственно его разрешающая способность. Это характерно и для других спектрометров с подобными спектрометрическими формирователями [Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике / Ю.К.Акимов, О.В.Игнатъев, А.И.Калинин, В.Ф.Кушнирук. - М.: Энергоатомиздат. 1989 г., 344 с.].

Таблица 1				
Зависимость параметров спектрометра с формирователем типа $[(CR+SW)_{dif}+GI]$ от "защитного" интервала. $T_{peak}=t_{dif}$; $\tau_r=1/6,9T_{peak}$; $T_r=6,9\tau_r=T_{peak}$;				
	$T_{pr}=\infty$ (одиночный импульс)	$T_{pr}=2T_{peak}$	$T_{pr}=1 T_{peak}$	$T_{pr}=0$
CF	1,098	1,171	1,581	3,281
T_{p-u}	$7,9T_{peak}=10,35\tau_c$	$5 T_{peak}=6,55\tau_c$	$4T_{peak}=5,24\tau_c$	$3T_{peak}=3,93\tau_c$
где T_{pr} - "защитное" время;				

τ_c - константа шума (постоянная "белящего" фильтра);

CF - Cusp-Factor, коэффициент, показывающий во сколько раз отношение сигнала к шуму на выходе данного формирователя ниже, чем теоретически достижимое;

T_{p-u} - интервал наложений.

5 Таким образом, способ увеличения быстродействия спектрометров с детекторами без внутреннего усиления? заключающийся в применении формирователей спектрометрических импульсов с коммутацией постоянных времени, оказывается мало
10 эффективным из-за возникновения нестационарного, зависящего от скорости счета, шума.

Существует еще один способ увеличения быстродействия, в равной мере применимый как к спектрометрам с времяинвариантной фильтрацией сигналов, так и с
15 времявариантными формирователями. Этот способ может быть назван "способом линейной, или аналоговой компенсации". Пример одной из возможных реализаций способа показан на фиг.6 [Blatt S.L., Mahieux J., Kohler D. Elimination of pileup distortion in nuclear radiation spectra. Nucl. Instrum. and Meth., v.60 1968 p.221-230; Н.Ф.Школа, О.В.Игнатъев, Б.С.Новисов и др. Спектрометрический усилитель. Авт.Свид. СССР №2827826, зарег. в Госреестре изобретений 08 октября 1980 г.]. В данном случае в
20 состав компенсатора входят CR-дифференциатор 13, линейный усилитель 14, аналоговая задержка 15, времявариантный формирователь компенсирующих импульсов, линейный сумматор 17 и основной спектрометрический формирователь 18 (любого типа).

В основе способа лежит тот факт, что в спектрометре, на входе формирователя
25 импульсов можно выделить или создать спектрометрические импульсы экспоненциальной формы, из которых позже формируются импульсы необходимой формы, поступающие на аналого-цифровой преобразователь. Такие экспоненциальные импульсы легко могут быть воспроизведены в виде
30 компенсирующих импульсов. Алгоритм компенсации таков: 1) задержка всего потока экспоненциальных импульсов на время T_{del} ; →2) обнаружение факта появления на заданном интервале времени T_{p-u} еще одного экспоненциального импульса; →3) формирование в течение времени задержки компенсирующего импульса-сателлита с той же амплитудой, что у импульса, подлежащего компенсации; →4) собственно
35 компенсация экспоненциальных импульсов и обработка разностного сигнала основным спектрометрическим формирователем. Соответствующие временные диаграммы показаны на фиг.7.

Принципиальный недостаток устройств, основанных на этом способе, заключается
40 в невозможности точной компенсации неинформативной части спектрометрических импульсов и обусловлен тем, что компенсирующий сигнал всегда содержит случайную (шумовую) составляющую. Уровень шума в компенсирующем канале, из-за заведомо неоптимального масштаба формирования, априори весьма высок. Следствием этого вновь является возникновение нестационарного шума с уровнем,
45 зависящим от времени между подвергнутым компенсации импульсом и последующим.

Существует еще один способ увеличения быстродействия (прототип), применяемый в спектрометрах с т.н. харуэльским импульсным процессором (Harwell pulse processors)
50 [K.Kandiah et al. A Pulse Processor for X-Ray Spectrometry with Si(Li)-Detectors. - IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1975, v.NS-22, №5, p.2058-2065; K.Kandiah, G.White. Status at Harwell of Opto-Electronic and Time-Variant Signal Processing for High Performance Nuclear Spectrometry with Semiconductor Detectors. - IEEE Trans., 1981, v.NS-28, №1, p.613-620; G.White. Pulse Processing for Gamma Ray Spectrometry. A Novel Method and its Implementation. - IEEE

Trans., 1988, v.NS-35, №1, p.125-130]. Принцип действия спектрометров, использующих способ безшумового укорачивания импульсов (в предусилителе), проиллюстрирован в упрощенном виде на фиг.8 и 9.

Выход безрезистивного блока детектирования 19 с оптической обратной связью соединен со входом импульсного процессора, содержащего в своем составе линейный усилитель 20, аналоговую линию задержки 21, времявариантный RC-интегратор (параллельно включенные интегрирующий резистор 22 и нормально разомкнутый электронный ключ 23 с внутренним сопротивлением, в "m" - раз меньшим, чем сопротивление резистора 22, а также интегрирующая емкость 24), буферный усилитель 25, времявариантный CR-дифференциатор (дифференцирующая емкость 26 и нормально замкнутый электронный ключ 27 с внутренним сопротивлением, равным нулю) и стробируемый "идеальный" интегратор 28. Контроллер 29 в данном случае выполняет функции обнаружения импульсов, анализа временных интервалов между импульсами и общее управление спектрометром.

Блок детектирования спектрометра с харуэльским процессором отличается от обычных блоков детектирования с оптическим восстановлением [Landis D.A, Goulding F.S., Pehl R.S. et al. Pulsed feedback techniques for semiconductor detector radiation spectrometers. IEEE Trans. NS-18, 1971, №1, p.115-123], ставших классическими, только логикой работы. Любой безрезистивный зарядочувствительный предусилитель по сути есть прецизионный интегратор. Его реакция на короткий импульс тока полупроводникового детектора при регистрации γ -кванта - ступень напряжения (см. диаграмму V_a на фиг.5) с амплитудой пропорциональной энергии поглощенного γ -кванта. Ясно, что процесс суммирования ступеней напряжения не может быть бесконечным. Если в обычных оптоэлектронных блоках детектирования излучения разряд, или компенсация накопленного на емкости обратной связи предусилителя индуцированного квантами излучения заряда происходит после достижения процессом заданного уровня, то в спектрометрах с харуэльскими процессорами, процедура компенсации предусмотрена для каждого импульса от зарегистрированного детектором кванта излучения. Соответствующие временные диаграммы приведены для отмеченных точек упрощенной структуры спектрометра на фиг.9.

С возникновением очередной "ступени" напряжения на выходе безрезистивного зарядо-чувствительного предусилителя (диаграмма V_a) через время задержки T_{D1} , необходимое для обнаружения этого импульса, в процессоре начинается времявариантное формирование сигнала: размыкается нормально замкнутый электронный ключ 27 (диаграмма V_f), одновременно стробируемый интегратор 28 переходит из режима усилителя с нулевым коэффициентом передачи в режим "идеального" интегрирования. Постоянная времени дифференциатора τ_{GD} скачком переходит из состояния $\tau_{GD}=0$ в $\tau_{GD}=\infty$. Благодаря этому на емкости 26 стробируемого дифференциатора запоминается мгновенное значение напряжения (постоянного уровня и шума) в момент коммутации ключа. Из суперпозиции RC-интегрируемых ступени напряжения, шума и постоянного уровня, с которого началась "ступень" (диаграмма V_c), вычитается запомненное емкости 26 дифференциатора напряжение. На вход стробируемого идеального интегратора 28 поступает RC-интегрированный сигнал уже "привязанный" к нулю (диаграмма V_e), а не к постоянному уровню. Естественно, что мгновенное значение шума, запомненное на емкости 26 в момент размыкания ключа 27, также вычитается из RC-интегрируемой ступени на всем протяжении времени формирования T_{sh} . В зависимости от полярности запомненного значения шума происходит либо увеличение, либо уменьшение относительно истинной

величины RC-проинтегрированной "ступени".

Незадолго до истечения времени формирования T_{sh} (за время, равное времени задержки T_{D1} элемента 21) контроллер 29 генерирует разрядный импульс фиксированной амплитуды (диаграмма Vb), который поступает в блок детектирования 19 на светодиод (LED), находящийся в оптическом контакте с р-п-переходом полевого транзистора (его обозначают JFET) зарядочувствительного предусилителя. Под действием света генерируется ток затвора и происходит разряд емкости обратной связи C_f предусилителя. На выходе блока детектирования происходит быстрое укорачивание неинформативной части ступенчатого импульса. Разрядный импульс, поступающий на светодиод (и разрядный ток затвора полевого транзистора, соответственно), прерывается, когда контроллер 29 фиксирует пересечение нуля процессом на выходе линейного усилителя 20 (фактически на выходе блока детектирования). Поскольку предусилитель во время восстановления остается в активном и линейном режиме, то наличие шумовых импульсов приводит к тому, что останов происходит не точно при $V_a=0$, а вблизи нуля, в зоне $\pm V_{noise_max}$, где V_{noise_max} - максимальное значение шума на выходе линейного усилителя 20. Таким образом, базовый уровень на выходе линейного усилителя 20 флуктуирует от импульса к импульсу.

По прошествии времени $\Delta t = T_{sh}$ с момента возникновения импульса на входе время-вариантного формирователя начинается укорачивание неинформативной части сформированного спектрометрического импульса. Для этого одновременно замыкаются электронные ключи 23 и 27, а стробируемый идеальный интегратор 28 возвращается в исходное состояние (усилителя с нулевым усилением). При этом ключ 27 и стробируемый интегратор 28 остаются в этом состоянии до появления следующего спектрометрического импульса, электронный ключ 23 остается замкнутым лишь на время, достаточное для того, чтобы интегрирующая емкость 24 с уменьшенной почти в m -раз постоянной времени разрядилась до среднего значения базовой линии на входе RC-интегратора. Фильтрация высокочастотного шума в течение времени, пока ключ 23 замкнут, ухудшена (диаграмма Vc).

Таким образом, спектрометре с харуэльским процессором применены два способа укорачивания неинформативной части спектрометрических импульсов.

Первый способ, состоящий в инъекции компенсирующего тока на вход блока детектирования, не оказывает никакого влияния на вид функции памяти спектрометра $W(t)$ т.к. передаточная функция по отношению к шумовым импульсам ни коим образом не изменяется во время компенсации заряда на C_f . Напряжение на выходе блока детектирования в это время представляет сумму линейно падающего напряжения, вызванного интегрированием компенсирующего тока и стационарного электронного шума. Недостаток столь простого алгоритма укорачивания - принципиальная невозможность остановить процесс компенсации в момент времени, когда сумма укорачиваемого сигнала и среднего значения шума равна нулю. В этом способе укорачивания просто отсутствует механизм нахождения среднего значения шума. Следствие этого, как отмечалось, - флуктуирующее от импульса к импульсу среднее значение базовой линии (диаграммы V_a и V_c).

Второй время-вариантный способ укорачивания, когда это значение достигается коммутацией (или изменением) констант формирования, приводит укорачиваемый импульс к нулевому значению (диаграмма V_e), но ценой возникновения нестационарного шума. Механизм его возникновения состоит в следующем. В момент размыкания ключа 23 (возврат к исходному значению постоянной RC -

интегрирования) на интегрирующей емкости 24 может быть любое из возможных значений высокочастотного шума. Оно, это мгновенное значение слабо интегрированного шума, запоминается на емкости 24 и затем, уже с исходной постоянной времени RC - интегратора, стремится к среднему значению процесса на его входе. Если между окончанием укорачивания предыдущего импульса и возникновением данного прошел малый промежуток времени, то на входе буферного усилителя 25 не успевает установиться стационарное (среднее) значение процесса. При размыкании нормально замкнутого ключа 27 стробируемого дифференциатора на его емкости 26 запомнится не только постоянное напряжение, соответствующее базовой линии, но и не успевшее достичь значения базовой линии шумовое напряжение. Этот эффект находит свое отражение в искажении оптимизированной для одиночных сигналов формы весовой функции спектрометра $W(t)$ (отмечено пунктиром на диаграмме "Весовая функция $W(t)$ "). Для того чтобы при повышенных статистических нагрузках фильтрация сигналов не ухудшалась слишком сильно, логика работы спектрометра предусматривает введение защитного времени T_{pr} (диаграммы V_g и "Весовая функция $W(t)$ ") Если импульс возник на этом интервале, то запускаются оба алгоритма укорочения, а амплитуда этого импульса не измеряется.

В итоге быстрое, не влияющее на отношение сигнала к шуму, но неточное укорачивание импульсов в блоке детектирования требует последующего специфического время - вариантного формирования, привносящего нестационарный шум и значительное увеличение времени, требующегося для обработки одного события.

Идея укорачивания неинформативной части спектрометрических импульсов инъекцией тока, компенсирующего накопленный в предшествующем периоде на время задающем элементе заряд, весьма продуктивна, но требует разрешения ряда противоречий и проблем.

1. Время, в течение которого должна быть осуществлена компенсация неинформативной части импульса, должно быть минимальным по отношению к заданному условиям оптимизации отношения сигнала к шуму длительности информативной части импульса. При заданных величинах время задающей емкости C_{sh} и максимального заряда, подлежащего компенсации (или напряжения, обусловленного этим зарядом), сделать компенсацию быстрой можно только выбрав значительную величину разрядного, или компенсирующего тока I_c :

$$T_{DCh} = V_{sh} C_{sh} / I_c, \quad (3)$$

где T_{DCh} - время разряда емкости формирователя,

V_{sh} - напряжение, подлежащее компенсации.

Даже в модельной ситуации, когда шум отсутствует, невозможно точно до нуля (или любого иного заданного напряжения) разрядить емкость формирователя постоянным током, поскольку сигнализирующий о достижении процессом нуля импульс любого компаратора, определяющего факт достижения процессом на его входе заданного уровня, сам по себе возникнет с некоторой задержкой из-за конечного быстродействия этого компаратора и поледующих электронных схем.

Величина перерегулирования равна:

$$V_{ovcl} = I_c \times T_{de} / C_{sh}, \quad (4)$$

где T_{de} - величина задержки по цепи компенсации.

Для применяемых в спектрометрах компараторов эта задержка составляет $3 \div 5$ ns. Если же крутизна сигнала на входе компаратора невелика, то начинает сказываться

зарядочувствительность компаратора. Наличие усилительных секций между разряжаемой емкостью и нуль-компаратором, а также коммутируемого генератора тока, только увеличивает задержку отключения разрядного тока. Типичная величина задержки составляет $25 \div 30$ ns.

5 Численный пример 1. Пусть мы хотим укоротить импульс на емкости 24 (фиг.8) без применения электронного ключа 23 инъекцией компенсирующего тока, как это делается в блоке детектирования 19 (с помощью коммутируемого генератора тока). Пусть при этом $C_{sh}=1$ nF, $T_{sh}=20$ μ s, максимальная амплитуда в спектре
 10 $V_{sh_max} = 2,5$ V, диапазон амплитуд $D=100:1$, т.е. $V_{sh_min}=25$ mV, время задержки в цепи управления компенсацией $T_{de}=25$ ns, а время компенсации $T_{DCsh}=0,1 \times T_{sh}=2$ μ s.

Из формулы (3) получаем $I_c=1,25$ mA. Подставив этот результат в формулу (4), находим, что перерегулирование составляет $V_{ovcl}=31,25$ mV, а это больше, чем
 15 минимальная амплитуда, которая должна быть зарегистрирована. Импульсы всех амплитуд будут иметь выброс противоположной полярности, спадающий к значению базовой линии на входе с постоянной времени 20 μ s, вместо избавления от неинформативной части спектрометрических импульсов происходит ее увеличение.

2. Очевидно, что для достижения малого времени компенсации заряда и
 20 пренебрежимо малого перерегулирования компенсирующий ток должен на конечной стадии компенсации уменьшить свою величину. Казалось бы можно порог компаратора можно заранее установить большим того уровня, до которого должна быть компенсация, на величину перерегулирования V_{ovcl} . Сигнал на отключение
 25 генератора компенсирующего тока пойдет с упреждением и процесс компенсации остановится точно в момент достижения заданного уровня. Но такой прием мало пригоден из-за того, что в спектрометрах с полупроводниковыми детекторами всегда присутствует относительно большой шум.

Численный пример 2. Пусть сохраняются все условия предыдущего примера.
 30 Дополнительные условия таковы: максимальная амплитуда $V_{sh_max} = 2,5$ V, соответствует энергии γ -квантов 5,9 keV, а уровень шума в спектрометре таков, энергетическое разрешение по линии генератора (ширина пика генератора на половине высоты в спектре энергий) составляет $\eta_{gen}=100$ eV. Легко
 35 показать, что максимальные выбросы шума V_{noise_max} (в единицах энергии) составляют $\approx \pm 1,5 \eta_{gen} = \pm 150$ eV. В единицах напряжения это составит $\pm (2,5 V/5900) \times 150 \approx \pm 63,5$ mV, т.е. амплитуды шумовых импульсов вдвое превышают предустановленный порог и процесс компенсации будет останавливаться внутри этой
 40 зоны, а не по достижении базовой линии.

3. Как добиться того, чтобы процесс компенсации накопленного на
 времязадающем элементе спектрометра заряда от информативной части спектрометрического импульса шел не до достижения процессом случайного из-за
 45 присутствия шумов уровня, а до среднего значения заданного уровня? Это самая главная проблема. При решении этой проблемы нужно иметь в виду, что среднее значение нормального гауссова шума имеет нулевое значение.

Задачей изобретения является создание способа увеличения быстродействия спектрометров ионизирующих излучений с ионизационными детекторами без
 50 внутреннего усиления, основанного на укорачивании неинформативной части спектрометрических импульсов, включая образованную наложениями других импульсов, путем инъекции в конденсатор, составляющий часть спектрометрического формирователя, компенсирующего заряда таким образом, чтобы в процессе инъекции

упомянутого заряда не изменялась передаточная функция спектрометра по отношению в шумовым импульсам, а среднее значение аддитивной смеси сигнала и шума к концу компенсации равнялось заданному уровню.

Указанная задача решается тем, что инжекцию компенсирующего заряда в конденсатор, составляющий часть спектрометрического формирователя, осуществляют компенсирующим током, изменяющим направление при каждом пересечении заданного уровня процессом, представляющим собой аддитивную смесь спектрометрического импульса, шума и компенсирующего заряда, при этом для достижения быстрого укорачивания и точного приведения укорачиваемого импульса к заданному уровню знакопеременный компенсирующий ток по ходу процесса уменьшают в функции времени таким образом, чтобы на заключительной стадии процесса компенсации вызываемые этим током изменения напряжения на упомянутом конденсаторе составляли не более 1/10 от среднеквадратичного значения шума в точке компенсации до ее начала, а продолжительность заключительной стадии компенсации выбирают не меньшей, чем 10 средних длительностей шумовых импульсов.

Последующие соотношения наряду с формулами (3) и (4) позволяют определить требуемые параметры процесса компенсации.

Частота R_{noise} пересечения шумом со среднеквадратичным значением $\sqrt{V_{noise}^2}$,

заданного уровня V_{th} дается формулой [Бунимович В.И. Флуктуационные процессы в радиоприемных устройствах. - М. 1951; Мелешко Е.А., Митин А.А. Измерительные генераторы в ядерной электронике. М.: Атомиздат, 1981 г., 256 с.]:

$$R_{noise} = \frac{\Delta f}{\sqrt{3}} \exp\left(-V_{th}^2 / 2V_{noise}^2\right), \quad (5)$$

где Δf - полоса частот шума в точке компенсации.

Для однополюсной частотной характеристики полоса частот шума на ее выходе связана с величиной полюса соотношением [Проектирование и применение операционных усилителей. Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. - М.: Мир, 1974, 510 с.]:

$$\Delta f = \pi f_p / 2 = \pi / 2\pi \times 2 \times RC = 1/4RC \quad (6)$$

При многополюсной частотной характеристике с равными полюсами можно с достаточно высокой степенью точности считать, что

$$\Delta f = f_p = 1 / 2\pi RC \quad (7)$$

При нулевом пороге из (5) имеем:

$$R_{noise_max} = \Delta f / \sqrt{3} \quad (8)$$

Основываясь на том, что среднее значение стационарного гауссова шумового процесса равно нулю, можно определить среднюю длительность T_{W_noise} шумовых импульсов (длительность превышения нулевого порога). Очевидно, что

$$T_{W_noise} = 1 / 2 R_{noise_max} = \sqrt{3} / 2\Delta f \quad (9)$$

Таким образом, точная и быстрая компенсация неинформативной части спектрометрических импульсов без ухудшения отношения сигнала к шуму, получаемого с исходным формирователем импульсов, может быть достигнута при выполнении следующих условий (независимо от схемной реализации устройства, реализующего компенсацию - следящего компенсатора):

1) Компенсация заряда, накопленного на времязадающей емкости формирователя под действием информативной части спектрического импульса, должна происходить биполярным током в течение двух фаз - "быстрой" и "точной".

2) Время задержки по петле регулирования T_{de} должно быть минимально возможным для минимизации ошибок и регулирования V_{ovcl} .

3) В течение "быстрой" фазы должна происходить компенсация значительным током основной части накопленного на конденсаторе под действием спектрометрического импульса заряда до достижения процессом, представляющим собой аддитивную смесь сигнала и шума, заданного уровня с точностью до перерегулирования $\pm V_{ovcl}$.

4) В течение "точной, более длительной, чем "быстрая" фазы биполярный разрядный ток уменьшается до такой степени, чтобы в конце ее, при данном времени задержки по петле регулирования, за одну среднюю длительность шумового импульса T_{W_noise} (см. формулу 9) амплитуда реакция была на него не более $\sqrt{V_{noise}^2}$.

5) Продолжительность "точной" фазы T_{sl} должна быть не менее 10 средних длительностей шумовых импульсов $(T_{sl} \geq 10T_{W_noise} = 5\sqrt{3}/\Delta f)$, чтобы за время ее с высокой точностью напряжение на конденсаторе формирователя импульсов достигло среднего значения шумового процесса, т.е. заданного уровня, например нуля.

Реализации способа показаны на фиг.10-11, где приведены два варианта формирователей, реализующих способ "бесшумового" укорачивания спектрометрических импульсов.

На фиг.10 показан подвергшийся изменениям фрагмент спектрометра с харуэльским процессором, а на фиг.11 приведены диаграммы сигналов в выделенных точках. Изменения коснулись следующего (см. фиг.8 и 10): ко входу и выходу R - интегратора, содержащего резистор 31 и емкость 32 теперь подключены входы стробируемого компаратора 30; вместо электронного ключа, уменьшавшего постоянную времени RC - интегратора, введена пара нормально разомкнутых электронных ключей 33 и 34, предназначенных для подключения к выходу RC - интегратора управляемых генераторов положительного 35 и отрицательного 36 токов. Управление ключами 33 и 34 осуществляется положительными сигналами с прямого и инверсного выходов стробируемого компаратора 30, который функционирует только при наличии положительного управляющего сигнала от контроллера 40 на входе стробирования. Буферный усилитель 37, стробируемый дифференциатор, состоящий из емкости 38 и нормально замкнутого электронного ключа 39 с нулевым сопротивлением, выполняют прежние функции. Контроллер 40 дополнительно выдает аналоговый экспоненциальный импульс (диаграмма Vf) для синхронного изменения тока генераторов тока 35,36. Элементы 30,33-36 вместе с контроллером 40 выполняют функцию следящего компенсатора.

На стадии укорачивания неинформативной части спектрометрических импульсов контроллером 40 выдается сигнал стробирования для компаратора 30 (диаграмма Vc) и компаратор начинает сравнивать импульсные напряжения на своих входах, замыкая положительными импульсами электронные ключи 33, 34 (диаграммы Vd, Ve), которые поочередно подключают генераторы разнонаправленных токов 35, 36.

Если выполнены обозначенные выше условия относительно скорости и величины реакции следящего компенсатора на изменение отклонения процесса от заданного значения на конечной стадии компенсации, то этим обеспечивается неизменность передаточной функции спектрометрического формирователя для шумовых сигналов на всех стадиях формирования импульсов при одновременном укорачивании спектрометрических импульсов. Этот факт отражается в том, что весовая функция спектрометра $W(t)$, являющаяся по сути функцией памяти, остается неизменной вне

зависимости от того, какое время прошло между окончанием предыдущего импульса и данного.

Другая реализация способа показана на фиг.12. Это упрощенная структура реализованного на практике процессора спектрометрических импульсов. Импульсы от блока детектирования с Si PIN-детектором и с импульсным восстановлением (т.е. не на каждый акт регистрации γ - кванта) сильно укорачиваются в линейном усилителе 41 и поступают на вход формирователя импульсов типа $[(CR)_{dif}+GI]$, т.е. с той же структурой, что и на фиг.4. На изодромном интеграторе (операционный усилитель 42, емкость 43 и резисторы 44, 45) происходит увеличение постоянной спада экспоненциального импульса до необходимой величины (фиг.13, осциллограмма Va), определяемой свойствами блока детектирования. Строблируемый идеальный интегратор 50 работает в течение всего времени формирования.

По окончании времени формирования (в данном случае $T_{sh}=16 \mu s$) по команде контроллера 51 начинается бесшумовое укорачивание экспоненциального импульса на выходе изодромного интегратора: стробируемый компаратор 46 по команде контроллера переходит в активный режим и, как в предыдущей схеме на фиг.10, поочередно замыкает электронные ключи 47 и 48, на аналоговые входы которых от контроллера поступает в течение всего времени компенсации импульс напряжения в виде ограниченной сверху экспоненты. Роль двух управляемых генераторов тока выполняют дифференциальный усилитель 49, имеющий коэффициент передачи ± 1 (полярность в зависимости от используемого входа) и резистор 45 на инвертирующем входе изодромного интегратора. Форма компенсирующего тока полностью совпадает с формой компенсирующего напряжения, показанной на осциллограмме Vb. Выходной импульс формирователя показан на осциллограмме Vc.

Технический результат применения заявляемого способа увеличения быстродействия спектрометров ионизирующих излучений с ионизационными детекторами без внутреннего усиления состоит в том, что появляется возможность на основе имеющихся времявариантных формирователей создания большого числа формирователей импульсов с укорачиванием неинформативной их части без ухудшения отношения сигнала к шуму, как в исходных, и увеличения на этой основе быстродействия спектрометров в целом. Созданный спектрометр с формирователем $[(CR)_{dif}+GI]$, реализующий заявляемый способ, при времени формирования $T_{sh}=T_{peak}=16 \mu s$ показал следующие характеристики:

- при изменении статистической загрузки по входу R_{in} с 10^3 до 32×10^3 1/s энергетическое разрешение по линии 5,9 keV ухудшилось с 166 до 175 eV. Это совпало со значениями, полученными в тех же условиях (с тем же блоком детектирования и при равных T_{peak} с образцовым спектрометром, имеющим квазитреугольный формирователь импульсов;

- скорость счета по выходу в спектрометре с компенсатором оказалась в 1,5 раза выше, чем в образцовом - $5,89 \times 10^3$ 1/s против $4,2 \times 10^3$ 1/s.

Осциллограмма, приведенная на фиг.13 относится к спектрометру, чьи характеристики приведены выше. "Точная" фаза компенсации в данном случае занимает приблизительно 20% от времени формирования T_{sh} .

Перечень фигур графических изображений

Фиг.1. Структура типового спектрометра ионизирующих излучений.

Фиг.2. Диаграммы напряжений в выделенных точках на фиг.1.

Фиг.3. Взаимосвязь между импульсной характеристикой (формой импульса) и весовой функцией спектрометра с времяинвариантным формированием сигналов.

Фиг.4. Времявариантный формирователь $[(CR)_{dif}+Sw+GI]$ с изменяемой электронным ключом Sw постоянной времени дифференцирования и стробируемым «идеальным» интегратором GI.

Фиг.5. Диаграммы напряжений в выделенных точках на фиг.4.

Фиг.6. Обобщенная структура формирователя спектрометрических импульсов с аналоговой компенсацией наложений.

Фиг.7. Диаграммы напряжений в выделенных точках на фиг.6.

Фиг.8. Спектрометр с "бесшумовым" укорачиванием сигналов в зарядочувствительном предусилителе и с времявариантным формирователем импульсов в импульсном процессоре [K.Kandiah et al. A Pulse Processor for X-Ray Spectrometry with Si(Li)-Detectors. - IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1975, V.NS-22, №5, P.2058-2065].

Фиг.9. Диаграммы напряжений в выделенных точках на фиг.8 и форма весовой функции спектрометра.

Фиг.10. Возможная реализация способа "бесшумовой" компенсации неинформативной части спектрометрических импульсов на примере формирователя харуэльского процессора [K.Kandiah et al. A Pulse Processor for X-Ray Spectrometry with Si(Li)-Detectors. - IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1975, V.NS-22, №5, P.2058-2065].

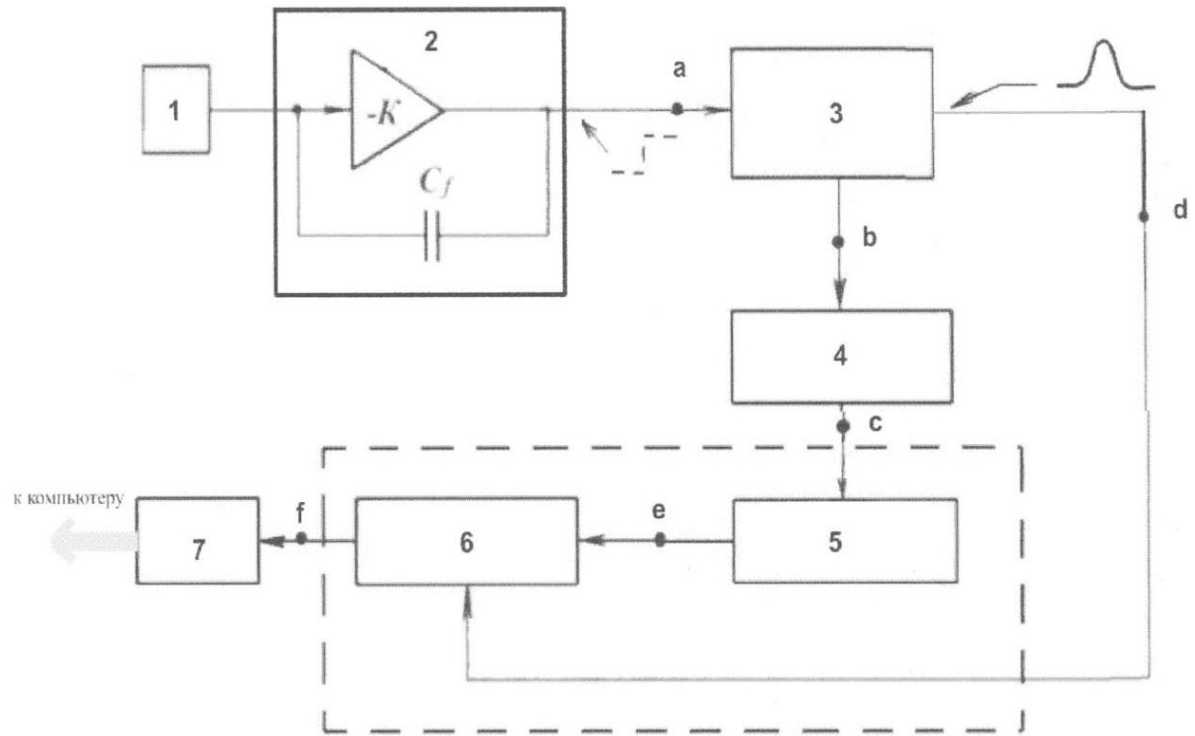
Фиг.11. Диаграммы напряжений в выделенных точках на фиг.10 и форма весовой функции спектрометра.

Фиг.12. Упрощенная структура реализованного формирователя импульсов с бесшумовым укорачиванием сигналов.

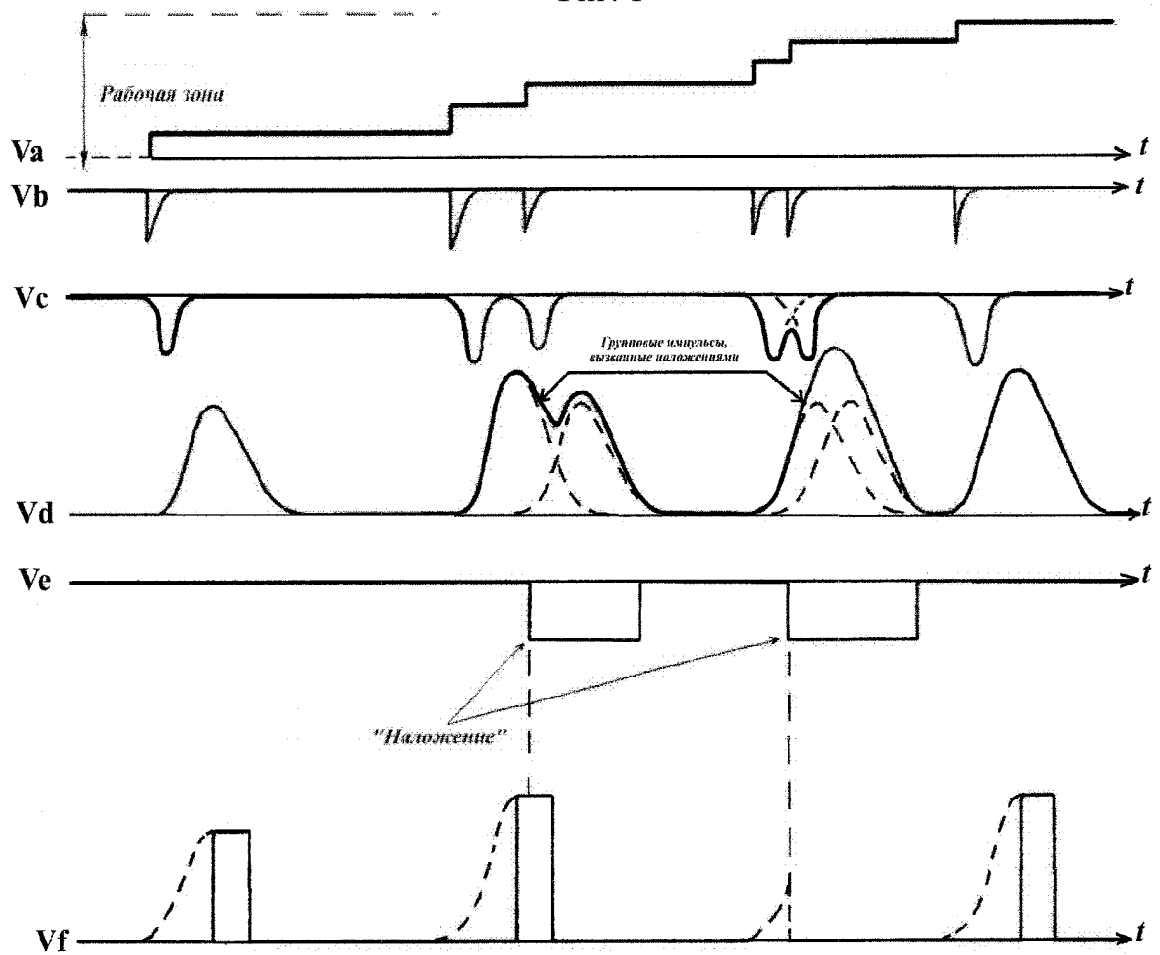
Фиг.13. Осциллограммы напряжений в выделенных точках на фиг.12.

Формула изобретения

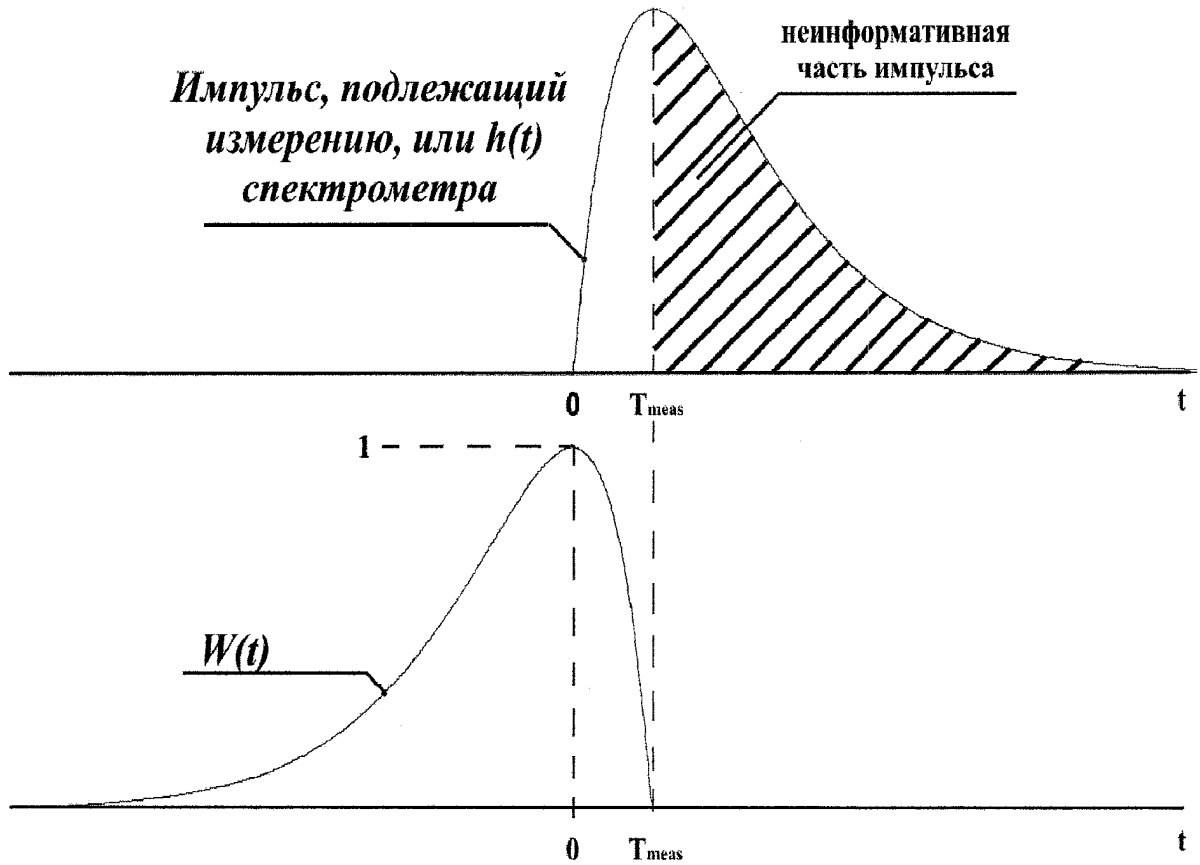
Способ увеличения быстродействия спектрометров ионизирующих излучений с ионизационными детекторами без внутреннего усиления, основанный на укорачивании неинформативной части спектрометрических импульсов, включая образованную наложениями других импульсов, путем инъекции в конденсатор, составляющий часть спектрометрического формирователя, компенсирующего заряда до пересечения процессом, представляющим собой аддитивную смесь сигнала, шума со среднеквадратичным значением $\sqrt{V_{noise}^2}$ полное частот Δf и компенсирующего заряда, заданного уровня в точке подключения упомянутого конденсатора, отличающийся тем, что инъекцию компенсирующего заряда в конденсатор осуществляют компенсирующим током, изменяющим направление при каждом пересечении процессом заданного уровня; при этом для достижения быстрого укорачивания и точного приведения укорачиваемого импульса к заданному уровню знакопеременный компенсирующий ток по ходу процесса уменьшают в функции времени таким образом, чтобы на заключительной стадии процесса компенсации вызываемые им изменения напряжения на упомянутом конденсаторе составляли не более $1/10$ от среднеквадратичного значения шума в точке компенсации до ее начала, а продолжительность заключительной стадии компенсации выбирают не меньшей, чем $5\sqrt{3} / \Delta f$.



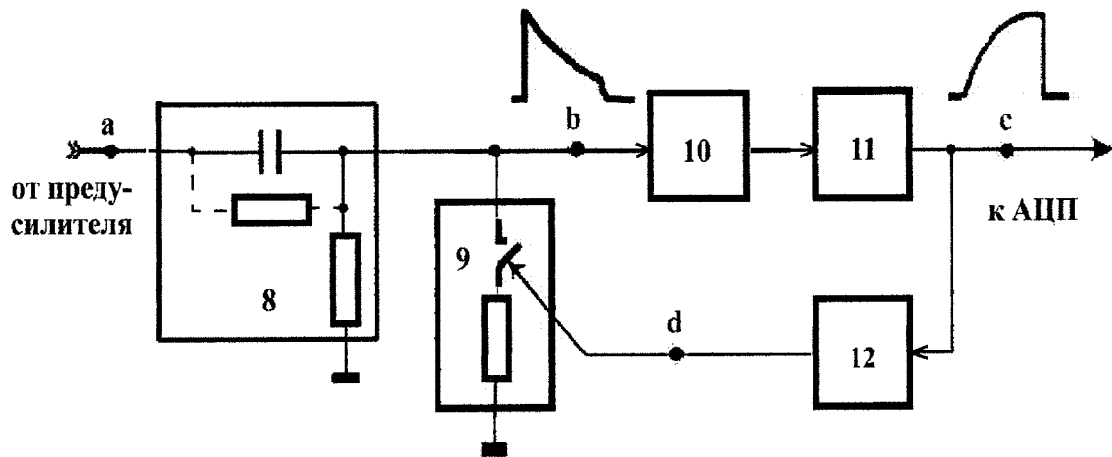
Фиг. 1



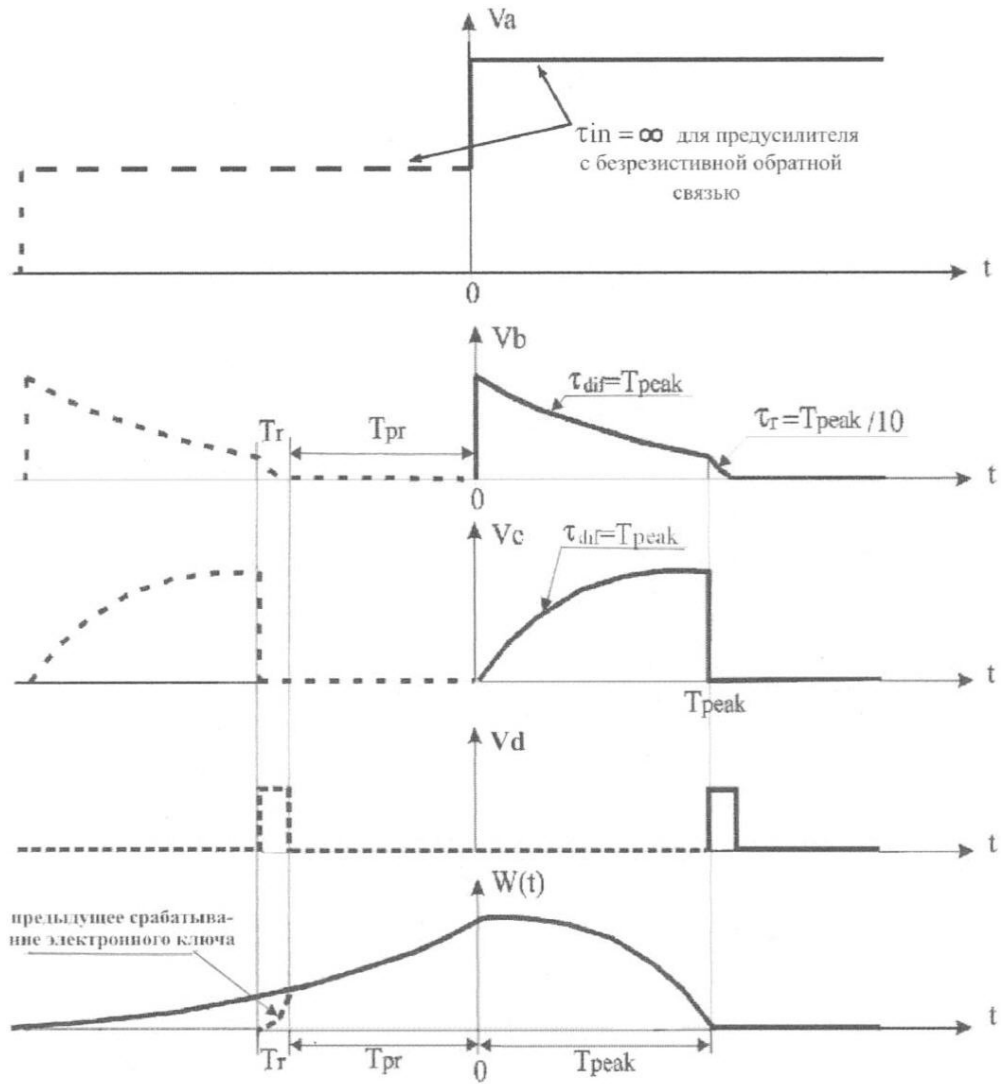
Фиг. 2



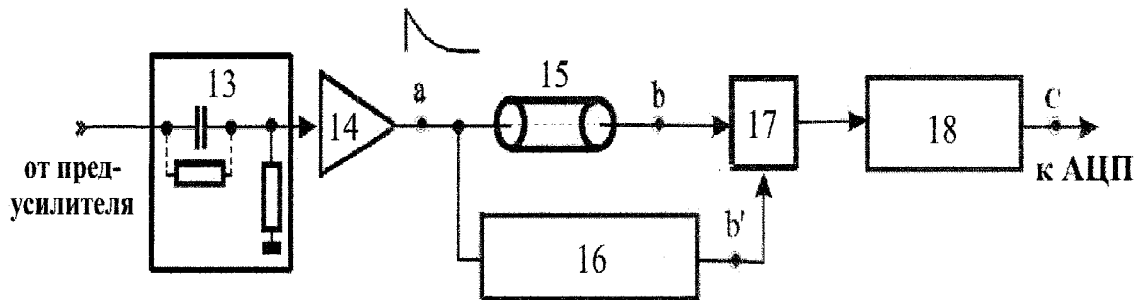
Фиг. 3



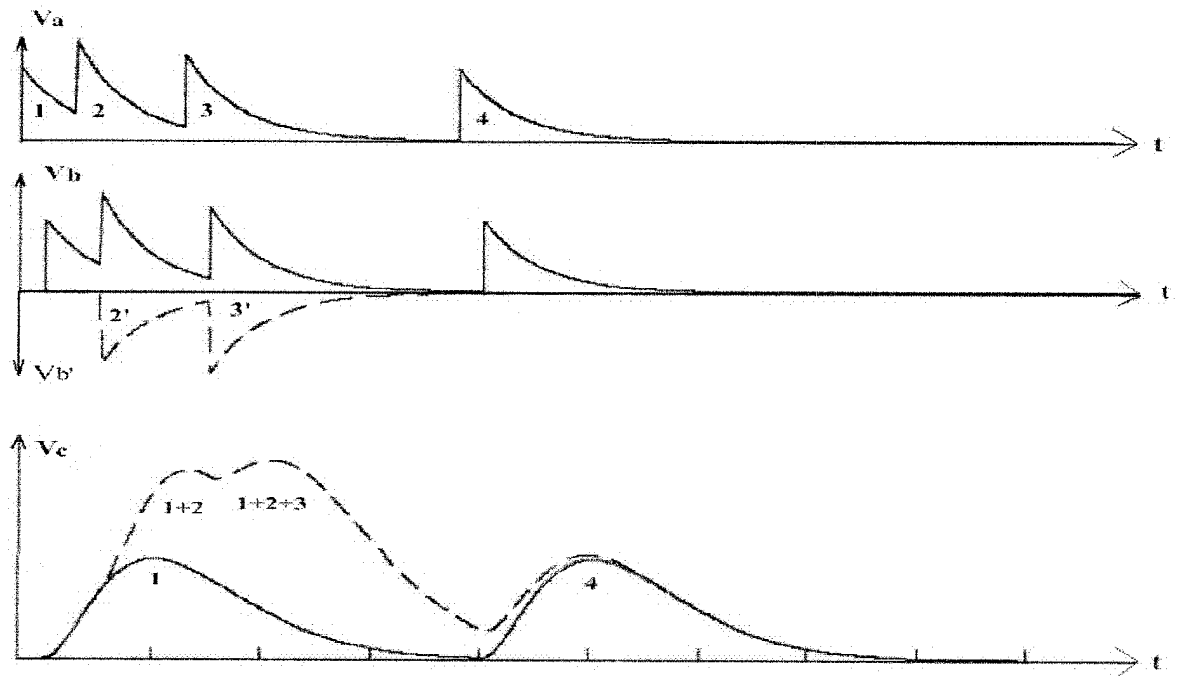
Фиг. 4



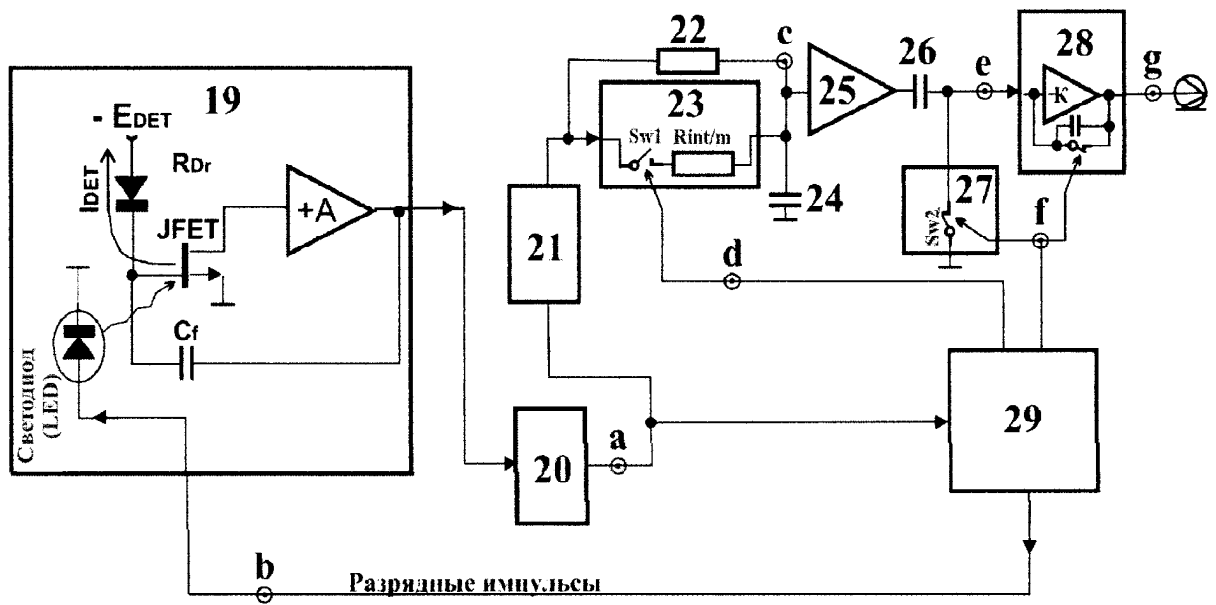
Фиг. 5



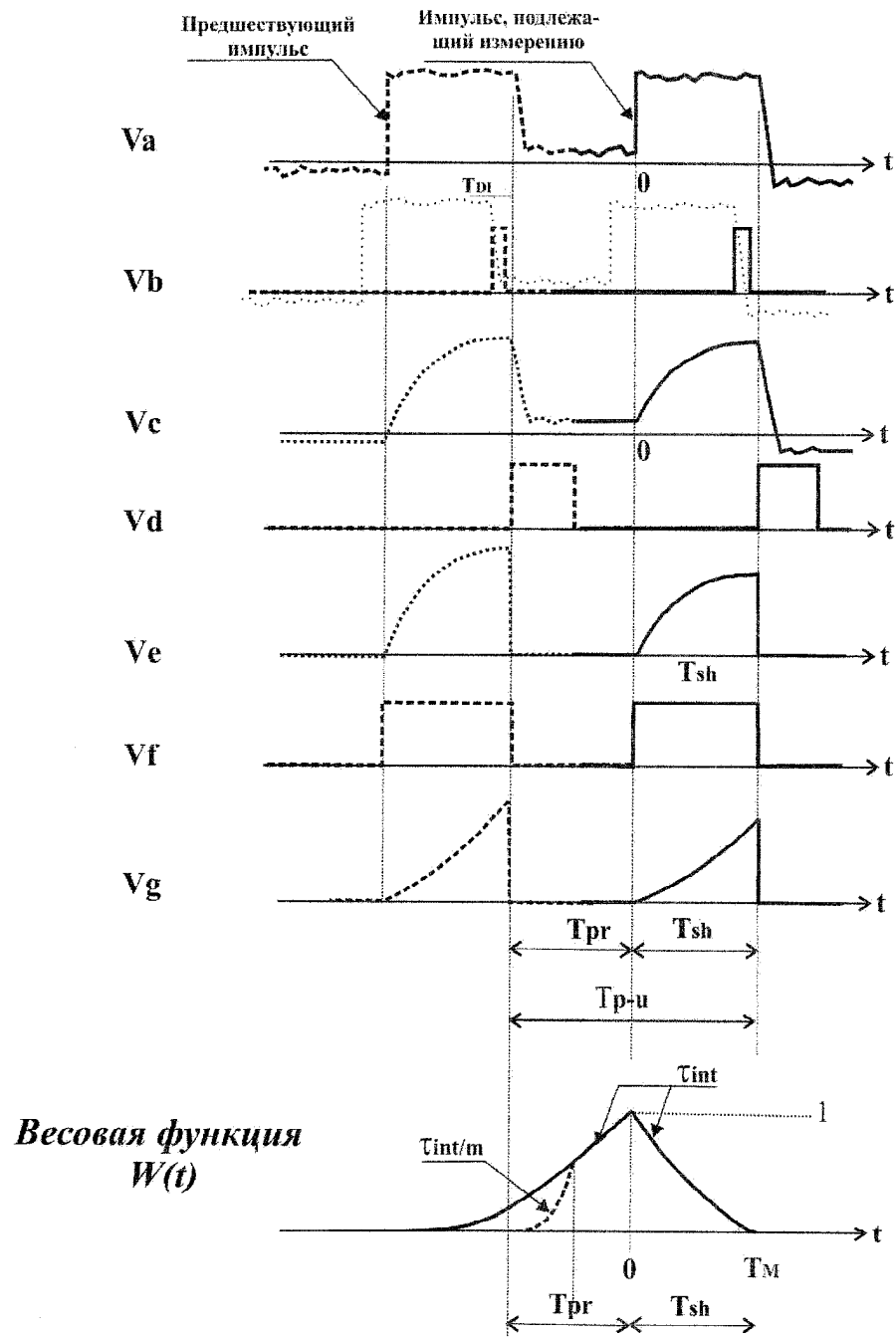
Фиг. 6

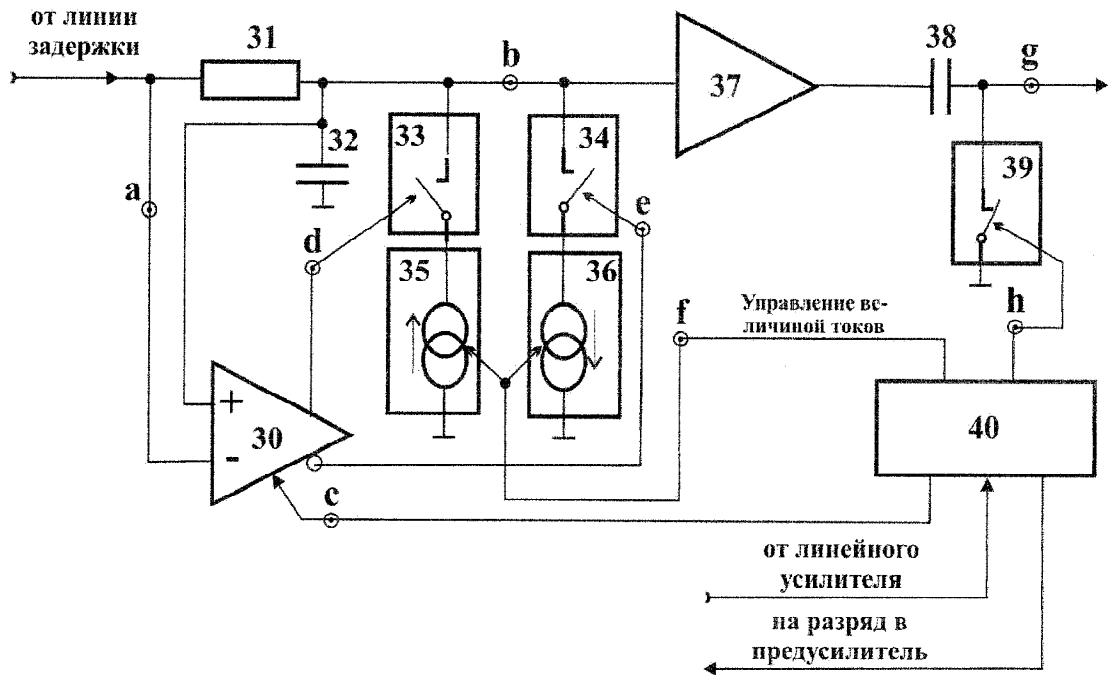


Фиг. 7

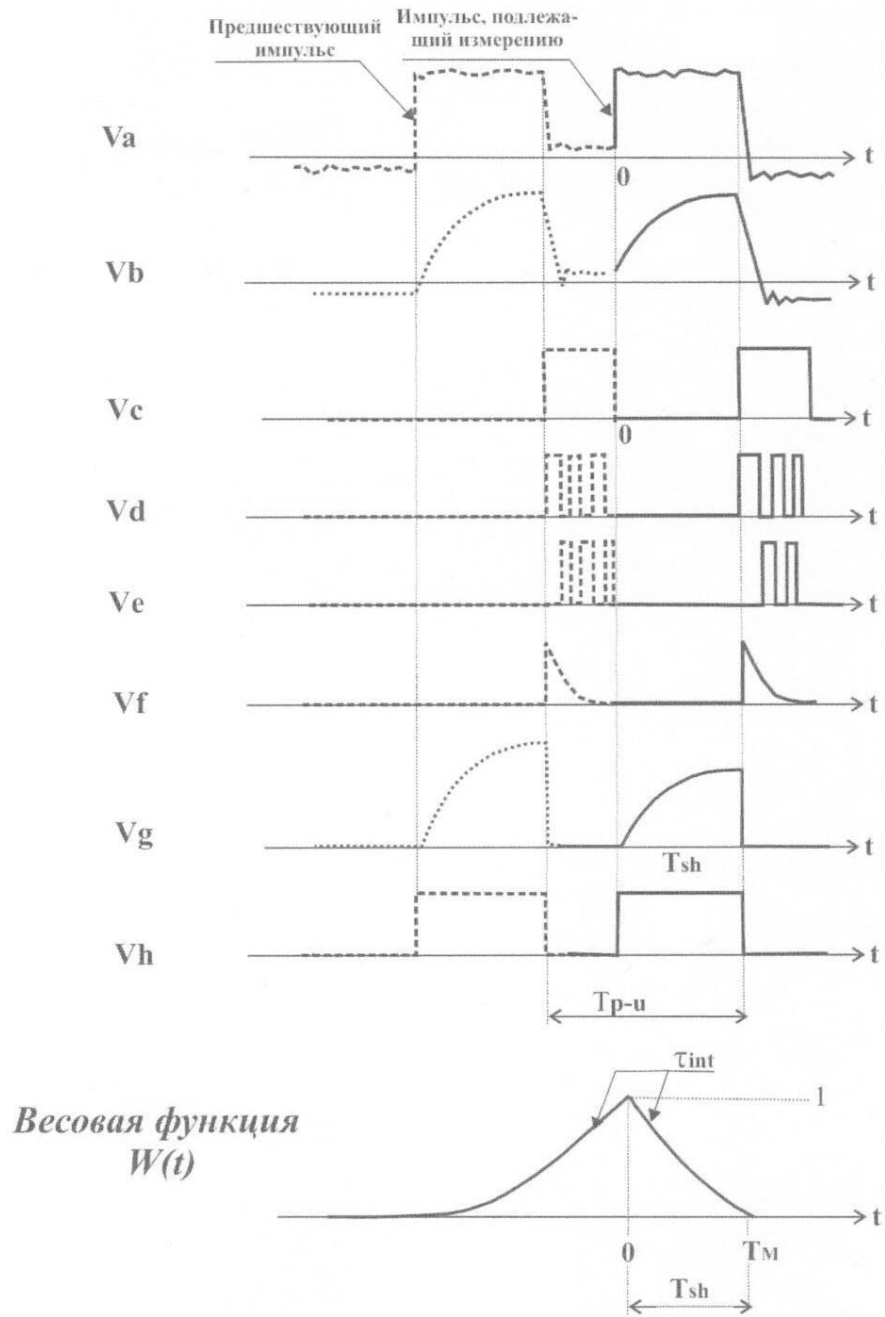


Фиг. 8

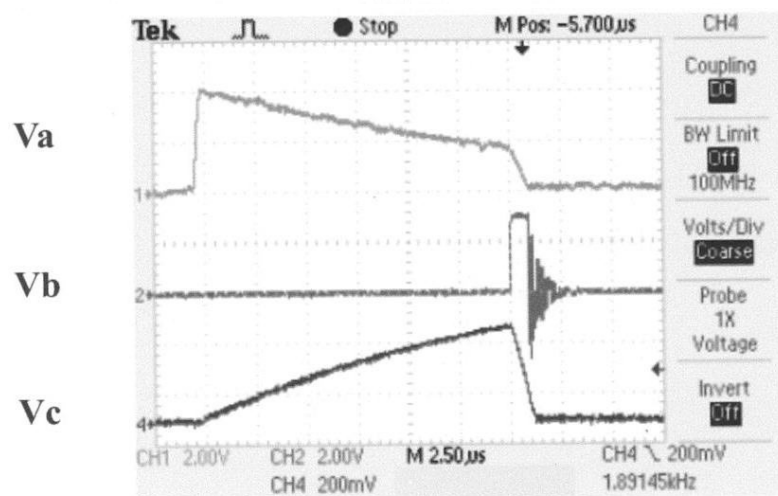




Фиг. 10



Фиг. 11



Фиг. 13